花生补灌条件下施氮对土壤氮素吸收与转化的影响*

胡家齐，夏桂敏**，张　奕，张柏纶，迟道才

(沈阳农业大学水利学院　沈阳　110161)

摘　要：为提高辽西地区花生产量和水氮利用率，本文以'白沙 1016'为对象，采取裂区试验，主区为雨养(W0)和测墒补灌(W1)两种灌溉模式，子区为 0 kg·hm^{-2}(N0)、40 kg·hm^{-2}(N1)、60 kg·hm^{-2}(N2)和 80 kg·hm^{-2}(N3)4 个施氮水平，研究施氮对测墒补灌条件下花生干物质积累和氮素积累及分配的影响。试验结果表明：在雨养和测墒补灌条件下，花生成熟期的单株干物质量分别为 64.66~74.92 g 和 71.65~92.81 g，以 W1N3 处理最高，W0N0 最低，且随施氮量呈现二次曲线变化趋势。花生植株氮积累量随施氮量变化趋势与干物质量一致，W1N2 较其他处理显著提高了氮素积累量、产量和水分利用效率。测墒补灌优化了花生植株中氮素的分配，延长了叶片氮素积累时长，同时提高了叶片氮素向荚果的转移量，继而相对雨养处理显著增加了花生荚果氮积累量所占植株氮积累总量的比重(氮收获系数)2.13%、氮肥农学利用率 78.57%、氮肥表观回收率 25.90%。花生收获后，土壤硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层内，占 0~60 cm 土层的 77.75%，且累积量随着施氮量的增高而增加，但补灌会使土壤硝态氮下移造成硝态氮淋失。因此，综合考虑水氮利用效率，在辽西半干旱地区推荐 W1N2 为适宜花生生产水氮管理，其产量、水分利用效率和灌溉水利用效率最高，分别为 6 485.03 kg·hm^{-2}、2.02 kg·m^{-3} 和 10.21 kg·m^{-3}。

关键词：花生；雨养；测墒补灌；氮素吸收与转化；硝态氮；水氮利用率

中图分类号：S27; TV93

Effect of nitrogen application on soil nitrogen absorption and transformation under supplementary irrigation of peanut*

HU Jiaqi, XIA Guimin**, ZHANG Yan, ZHANG Bailun, CHI Daocai

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Rainfed agriculture is a mode of critical production which relies on natural rainfall in arid and semiarid regions. However, it causes crop yield instability due to frequent insufficient water supply at key growth stages of crops. Thus supplemental irrigation based on soil moisture has been widely adopted as an alternative water-saving irrigation method. To determine the effects of different nitrogen (N) application rates on nitrogen absorption and distribution, yield of peanut and soil nitrate accumulation under rainfed or supplementary irrigation conditions, a split plot experiment was conducted using the 'Baisha 1016' peanut variety with different N and irrigation managements in semiarid region of West Liaoning Province. The aim of the study was to explore suitable water and N managements and provide support for "modulate N with water" in peanut cultivation in semiarid regions. The irrigation treatments included W0 (rainfed condition) and W1 (supplemental irrigation based on soil moisture with the lower limit of soil water content of 55% of field capacity). The N treatments included N0 [no N], N1 [40 kg(N)·hm^{-2}], N2 [60 kg(N)·hm^{-2}] and N3 [80 kg(N)·hm^{-2}]. The results indicated that biomass and plant N uptake were highest under W1N2 treatment (supplemental irrigation at N application rate of 60 kg·hm^{-2}) among all treatments at maturity stage of peanut. The yield and nitrogen accumulation of peanut increased with increasing nitrogen, but decreased at N3 dose. N application rate, irrigation mode and their interactions significantly affected yield, water use efficiency (WUE), N use efficiency (NUE) [including N agronomic efficiency (NAE), grain N recovery efficiency (GRE) and apparent N recovery efficiency (NRE), and N harvest index (NHI)]. Total plant pod N accumulation greatly increased due to the optimal distribution of N nutrient in peanut, and accelerated N transfer from leaf to kernel under W1 treatment. This created beneficial effects on increasing total plant pod N accumulation, peanut harvest index, agronomic N efficiency and yield. Compared with W0, W1 increased peanut NHI, NAE and NRE by 2.13%, 78.57% and 25.90%, respectively. Soil nitrate content was highest in the 0–20 cm soil layer after peanut harvest, but decreased with increasing soil depth. The accumulation of soil nitrate N at the 0–60 cm soil depth increased with increasing N application rate. However, supplementary irrigation accelerated the leaching loss of soil nitrate N. It was concluded that W1N2 treatment had the highest yield (6 485.03 kg·hm^{-2}), WUE (2.02 kg·m^{-3}) and irrigation WUE (10.21 kg·m^{-3}). It was therefore recommended as the best combination for water and N to improve peanut yield under drip irrigation with plastic film mulching in semi-arid regions in Western Liaoning Province.

Keywords: Peanut; Rainfed; Supplemental irrigation; Nitrogen absorption and transfer; Nitrate nitrogen; Nitrogen and water use

* 公益性行业(农业)科研专项项目(201303125)资助

**通信作者：夏桂敏，主要从事农业与生态节水理论与技术研究。E-mail: xiagm1229@126.com

胡家齐，主要从事农业节水理论与技术研究。E-mail: hu_hooolic@163.com

收稿日期：2017-06-05　接受日期：2017-08-02

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303125).

**Corresponding author, E-mail: xiagm1229@126.com

Received Jun. 5, 2017; accepted Aug. 2, 2017

efficiency

我国是一个油料消费大国,油料消费的增幅远高于供给增幅。2014 年度我国食用油自给率仅为36.8%[1]。制约我国食用油发展的因素很多，其中最重要的是种植面积增长空间有限[2]，因此提高作物单产成为增加油料作物供应的主要手段。花生(*Arachis hypogaea* L.)含油量高、耗氮量大，并且具有较高的单产潜力，但是由于我国耕地肥力普遍较低、土壤供氮能力差而无法满足花生等油料作物对氮素的需求[3]。因此，补施外源氮是提高花生产量的重要手段。据统计，2015 年辽宁省化肥施用量达到 152.1 万 t，其中氮肥和复合肥的施用量超过 80%[4]。但过量施用氮肥不仅不会增产，还容易导致植株营养器官异常生长，出现倒伏现象，降低经济系数[5]，且会抑制花生根瘤的形成，降低氮肥利用率[6]，同时还会引起农业面源污染和地下水硝态氮含量超标等现象[7-10]。而合理、适量施用氮肥，不仅可以维持作物的高产，还能缓解由施氮量过多而引起的污染。同时，在大面积种植花生的辽西半干旱地区，大部分为雨养种植。由于仅有少部分土地有灌溉条件，导致该地区花生在需水关键期得不到充足的水分供应。因而，水成为限制本地区花生生产的另外一个重要因素。虽然花生属于抗旱作物，但在其整个生长发育过程中仍然需要适量的水分，因为水分亏缺不仅严重影响花生的呼吸作用和光合作用[11]，而且会降低花生的收获指数，使植株生长发育受阻，产量降低[12]。

近年来，大量研究结果表明，适宜的水氮环境可以促进作物光合作用，利于作物的库源积累，并且提高养分在生殖器官中的分配比例，最终达到增产。而水氮调控不合理则会引起的早衰或减产。研究表明，增施肥料可以显著提高番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)光合和蒸腾速率、干物质量和产量，同时也能增加植株氮积累量，但过高的施肥量则会产生抑制效果[13]。学者在玉米(*Zea mays* L.)[14]、甜瓜(*Cucumis melo* L.)[15]和小麦(*Triticum aestivum* L.)[16]等作物上也得到了类似结论。花生作为耐旱耐瘠作物，合理的水氮供应显得更加重要。研究表明，增施氮肥可缓解干旱对花生根系生长的影响，进而增强花生地上部分的光合特性[17]。水和氮及其互作对花生产量的影响达到显著水平，且水效应大于氮效应[18-19]，但是干旱胁迫和过量灌溉都不利于养分积累，只有保持适量的土壤水分，才能促进营养吸收，提高氮利用效率[20-21]。施氮会使土壤硝态氮累积量增加，增加淋失风险，而适宜土壤水分状况，则可以促进作物氮吸收，降低硝态氮淋失，从而增加氮利用率。然而，在当地生产实践中，农户并没有足够重视这一点，为追求高产，往往采用高水高肥的方法，造成水氮资源浪费，甚至减产。因此，为提高辽西半干旱地区花生的水氮利用效率，本试验以花生品种‘白沙 1016’为研究对象，进行田间试验研究，研究雨养和测墒补灌下施氮对花生干物质积累和植株氮积累及分配以及土壤硝态氮积累量、产量和氮肥利用率的影响，以期为花生高效生产提供技术支撑和“以水调氮”提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 5—9 月在北温带半干旱季风大陆性气候区的阜新蒙古族自治县进行(121°02′~122°54′E, 41°42′~42°55′N)，海拔 213 m。总辐射量为 138.5 kWh m^{-2}，年平均气温 7.2 ℃，作物生育期平均气温 20.2 ℃，10 ℃以上积温 2 900~3 400 ℃；无霜期 150 d；多年平均降雨量为 493.1 mm，其中夏季占全年的 68.5%，春旱、秋吊现象频繁，试验期间降水量见表 1。年平均蒸发量为 1 847.6 mm。试验区土壤为砂壤土，容重 1.40 g cm^{-3}，田间持水率 32.19%(占体积百分比)，地下水埋深 8~13 m。土壤肥力中等，有机质含量为 13.05 g kg^{-1}，全氮含量 1.28 g kg^{-1}，碱解氮 92.15 mg kg^{-1}，速效磷 18.76 mg kg^{-1}，速效钾 201.43 mg kg^{-1}, pH 6.15。

表 1 试验年份花生生育期内降水量及有效雨量

Table 1 Precipitation and effective precipitation during peanut growth period in the study year mm

日期(年-月) Date (month-day)	05-14—05-31	06.01—06-30	07-01—07-31	08-01—08-31	09-01—09-17
降水量 Precipitation	12.4	42	236.9	80.7	7.6
有效降水量 Effective precipitation	64	24.5	147.8	71.3	7.6

1.2 试验材料与设计

试验在大田中进行，供试花生品种采用阜蒙县当地广泛种植的‘白沙 1016’。于 2016 年 5 月 14 日机械播种，试验地面积 500 m^2，花生种植密度 2.25×10^5 株·hm^{-2}。大垄双行种植，采用裂区试验设计，主区设置仅依靠自然降雨的雨养(W0)和测墒补灌(W1)2 个水平。垄距宽 100 cm，每垄种植两行。W1 处理两行中间铺设一条滴灌带，采取膜下滴灌，灌溉水为地下水；补灌标准为：当控水下限达田间持水量的 55%，进行复水至田间持水量的 90%。子区为施氮量，供试氮肥为尿素(氮质量分数为 46%)，设 4 个水平：0

kg(N)·hm^{-2}(N0)、40 kg(N)·hm^{-2}(N1)、60 kg(N)·hm^{-2}(N2)和 80 kg(N)·hm^{-2}(N3)。共 8 个处理，每个处理 15 m^2，各处理均施 P_2O_5 105 kg·hm^{-2}、K_2O 120 kg·hm^{-2}。磷肥为过磷酸钙，钾肥为硫酸钾。小区间用 80 cm 深高分子树脂分隔，以防止水分和养分侧渗，每个处理 3 次重复。

1.3 观测项目和方法

1.3.1 土壤含水率

在花生苗期、花针期、结荚期和饱果期用便携式土壤水分速测仪(Diviner 2000，澳大利亚 SENTEK 公司)测定 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 及 60 cm 的土壤含水量，每 5 d 测定 1 次，灌溉前后及降雨前后加测。

1.3.2 田间取样与测定方法测定

全生育期结束后用土钻取土，每 20 cm 取土 1 次，测定土层深度为 0~60 cm，每个小区取 3 个点，每个处理共取 9 个点，鲜样取回后捏碎，经风干后混匀过 2 mm 筛然，后用“四分法”分出足够样品，称取 5 g 风干土样，用 50 mL 的氯化钾溶液(2 mol·L^{-1})浸提，然后用全自动连续流动分析仪(Auto Analyzer-III，德国 Bran+Luebbe 公司)测定土壤硝态氮。

花生每个生育期结束后，每小区选取长势良好，且生长一致的 3 株花生，进行叶、根、茎、荚果取样，分解后放入干燥箱在 105 ℃下杀青 30 min, 75 ℃恒温干燥至恒重，用电子天平称重后粉碎并后过 0.5 mm 筛，用快速消解仪(Speed Digester K-436，瑞士 BUCHI 公司)进行消煮，利用凯氏定氮仪测定植株全氮。生育末期，单打单收，计算各小区花生产量。

1.3.3 耗水量(ET)

花生耗水量采用水量平衡方程进行计算:

$$\mathrm{ET}=W_0-W_t+W_T+P_0+K+M-F \quad (1)$$

$$W_T=667(H_2-H_1)\gamma(\theta_f-\theta) \quad (2)$$

$$P_0=\sigma\times P \quad (3)$$

式中: ET 为阶段耗水量(mm); W_0、W_T 为一个时段(生育期)始末的土壤计划湿润层内的储水量(mm), W_T 为由于土壤计划湿润层增加而增加的水量(mm); H_1 为计算时段初计划湿润层深度(mm); H_2 为计算时段末计划湿润层深度(mm); θ_f 为田间持水率(重量含水率); θ 为计划湿润层平均含水率(重量含水率); γ 为土壤容重; P_0 为时段内有效降雨量(mm); P 为次降雨量(mm); σ 为降雨有效利用系数($P\leqslant5$ mm 时，$\sigma=0$; $P=5\sim50$ mm 时，$\sigma=1$; $P\geqslant50$ mm 时，$\sigma=0.75$); K 为时段内地下水补给量(mm); M 为时段内灌水量(mm); F 为时段内渗漏量(mm)。地下水深度足够，故无地下水补给，$K=0$；由于试验采用的灌水方式为滴灌，灌水引起深层渗漏很小，可忽略不计，因此取 $F=0$

1.3.4 计算指标

水分利用效率(water use efficiency, WUE)=花生产量/耗水量 (4)

灌溉水利用率(irrigation water use efficiency, IWUE)=花生产量/灌溉水量 (5)

氮肥农学效率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)=(施氮区籽粒产量–不施氮区籽粒产量)/施氮量 (6)

植株氮积累量(nitrogen accumulation amount, NAA)=植株干重×植株含氮量 (7)

氮收获指数(nitrogen harvest index, NHI)=籽粒氮积累量/植株总氮积累量 (8)

籽粒氮肥吸收利用率(grain nitrogen recovery efficiency, GRE)=(施氮肥区籽粒氮积累量–不施氮肥区籽粒氮积累量)/施氮量×100% (9)

氮肥表观回收率(apparent nitrogen recovery efficiency, NRE)=(施氮肥区植株氮积累量–不施氮肥区植株氮积累量)/施氮量×100% (10)

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 进行数据汇总、分析和绘图, SPSS 20 进行统计分析和显著性检验(Tucky HSD 法，$P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 雨养和测墒补灌下不同施氮处理的干物质积累

不同灌溉模式和氮肥管理对花生干物质量和产量的影响如图 1 所示。雨养条件下不同施氮处理的花生单株干物质量和荚果产量比 N0 分别高 10.26~14.33 g 和 14.39~19.17 g，测墒补灌条件下为 15.71~21.16 g 和 8.51~12.85 g。回归分析(二次曲线)显示，雨养条件下，花生干物质量、荚果产量和施氮量的可决系数(R^2)分别为 0.963 2 和 0.983 7；测墒补灌下为 0.997 4 和 0.958 6，且全部达极显著水平。根据曲线方程计算可得：雨养条件下施氮 59.38 kg·hm^{-2} 可获得花生最大单株干物质量(77.51 g)，施氮 62.57 kg·hm^{-2} 得到最大单株荚

果产量 42.28 g·plant⁻¹。因此在没有灌水条件的雨养地区，建议施氮 62.57 kg hm⁻²。测墒补灌条件下，施氮量 82.80 kg hm⁻² 得到最大花生单株干物质量 92.30 g，单株荚果产量为 57.20 g。而由回归方程计算得出施氮量为 65.20 kg hm⁻² 时，可得到最大单株荚果产量, 58.03 g。二者产量上差异不大，但由计算所得最大产量时的施氮量却远远低于获得最大干物质量时的施氮量。为提高经济产量，在有灌水条件的区域推荐施氮 60 kg hm⁻²。

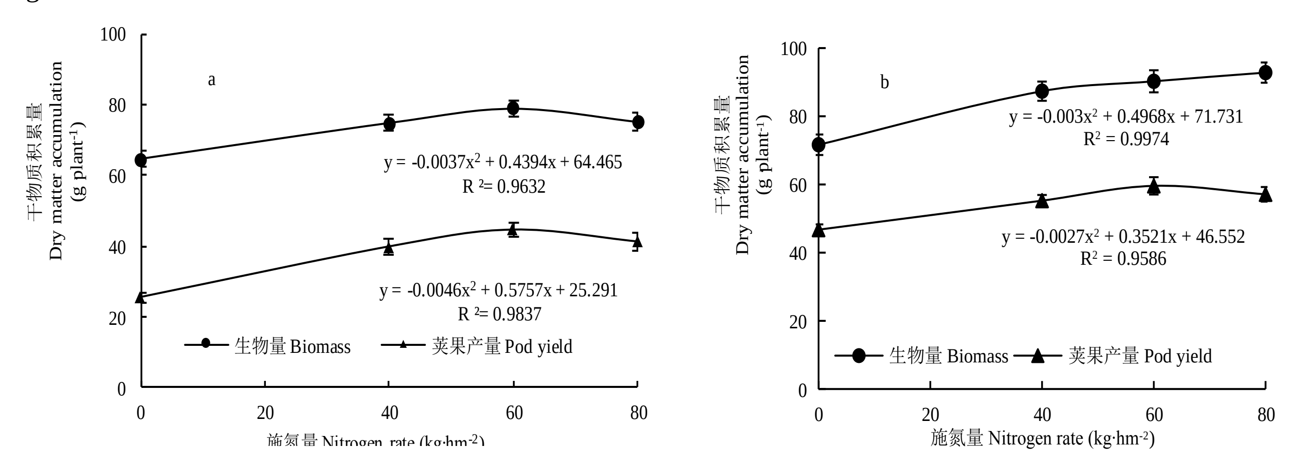
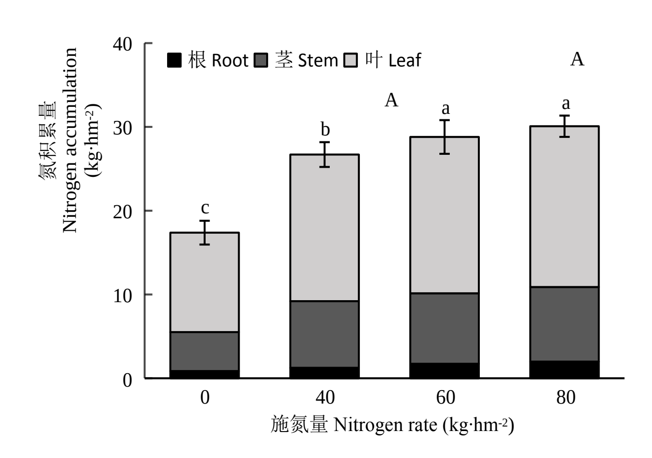


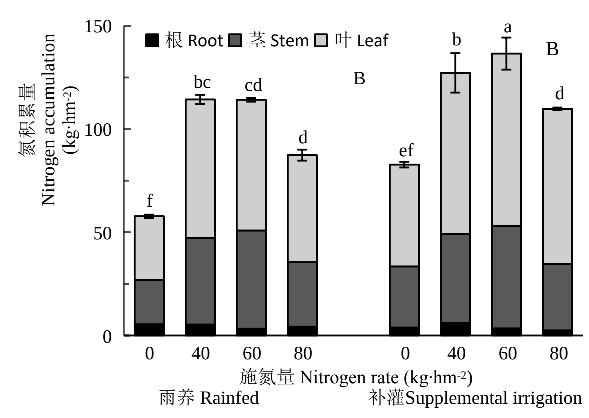
图 1　雨养(a)和测墒补灌(b)条件下施氮量对花生干物质量和荚果产量的影响

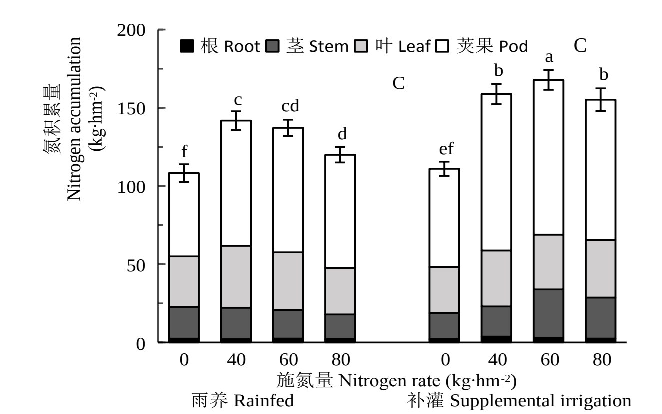
Fig. 1　Effect of nitrogen rate on dry biomass and pod yield of peanut under rainfed (a) and supplemental irrigation (b) conditions

2.2　花生不同生育期各器官氮素积累

施氮量对花生不同生育期各器官氮素积累量和分配的影响如图 2 所示。无论是雨养还是补灌条件，不同施氮处理的花生氮素积累量均存在明显差异，且不同生育期也存在差异。由图 2A 可知，花生苗期，根、茎、叶的氮积累量均随着施氮量的增加而增加, N2(60 kg hm⁻²)与 N3(80 kg hm⁻²)处理氮素积累总量最高，均显著高于 N0(不施氮)和 N1(40 kg hm⁻²)。花生各器官氮积累量表现为叶>茎>根。此结果表明，苗期花生各器官的氮素积累量和植株氮积累总量与施氮量在一定范围内呈正相关，但超过一定量便不再继续增加。因此，苗期水分条件相同的情况下，施氮量是影响植株氮吸收的主要因素。







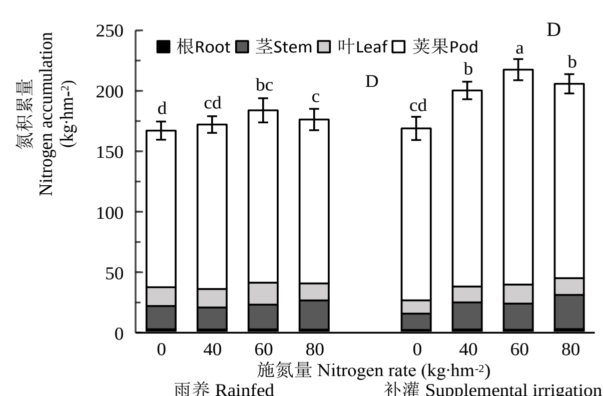


图 2　雨养和测墒补灌条件下施氮量对花生苗期(A)、花针期(B)、结荚期(C)和饱果期(D)各器官氮素积累量和分配的影响

Fig. 2　Effect of nitrogen rate on amounts of nitrogen accumulation and distribution in plant organs of peanut at seedling (A), pegging (B), podding (C) and pod filling (d) stages under rainfed and supplemental irrigation

由图 2B 可知，花针期相同施氮下，测墒补灌的植株总氮积累量显著高于雨养，平均高 22.11%，其根、茎、叶氮积累量亦高于雨养处理。相同水分条件下，各施氮处理的植株总氮积累量都显著高于 N0 处理，并全部达到显著水平。N1、N2 和 N3 处理相较 N0 增加 71.86%、78.41%和 40.25%，呈现先增高后降低的趋势，说明施氮对于花生植株氮吸收存在最大阈值。进入花生营养生长旺盛的花针期，由水分不同而引起的植株氮积累的差异开始显现，补灌和施氮都可以提高花生氮积累量，但是过量的施氮则会抑制氮积累。花生各器官氮积累量与苗期一致，表现为叶>茎>根。

由图 2C 可知，在结荚期荚果除 N0 处理外，其余施氮处理测墒补灌的植株氮积累量均显著高于雨养处理，并达到显著水平，测墒补灌相较雨养高 16.87%。雨养处理下花生植株的氮积累量在 N1 最高，并显著高于 N0 和 N3，而在测墒补灌处理下，则是 N2 最高，并显著高于 N1 和 N3，但 N1 与 N3 之间不显著。说明补灌增加了花生植株在高氮供应条件下的吸氮能力，改变了不同施氮条件下植株氮积累量的变化趋势。N0 处理下，土壤氮供应不足，而结荚期作为花生生殖生长的重要时期，仅靠花生自身根瘤固氮所提供的营养有限，不能满足花生的生长需求，因此雨养和补灌的植株氮积累量差异不显著。而在施氮处理下，水分对于花生氮积累起促进作用。相同灌溉条件下，各施氮植株氮积累量均显著高于 N0 处理，平均分别高 37.08%、39.11%和 25.47%。花生各器官氮积累量表现为荚果>叶>茎>根。经历了苗期和花针期的氮素积累，花生继续吸收氮素，并且同时库源氮素开始向荚果中转移。

由图 2D 可知，饱果期相同施氮处理下的植株氮积累规律及补灌对于花生植株氮积累的调节规律与结荚期类似，测墒补灌相较雨养处理的植株氮积累量高 13.32%；相同灌溉条件下，各施氮处理植株氮积累量均显著高于 N0 处理，平均分别高 10.83%、19.45%和 13.70%。除荚果外，其余各器官的氮积累量均呈下降的趋势，而荚果的氮积累量上升，此时花生各器官氮积累量表现为荚果>茎>叶>根。荚果的氮积累量占植株总积累量的 78.52%。雨养处理下花生荚果氮积累量为植株氮积累量总和的 77.70%，低于测墒补灌处理下的 81.20%，并且达到显著水平。说明花针—结荚期适量补灌相较雨养处理可以增加花生荚果所占植株总氮积累量的比重，有利于植株吸氮。

2.3　不同生育期花生叶片氮含量的变化

不同灌溉模式下氮肥管理对全花生生育期叶片氮浓度影响如图 3 所示。无论雨养还是补灌，花生叶片的氮**含量**均随着生育期的推进而下降。全生育期内，高氮处理叶片氮含量始终高于低氮处理。但是雨养和补灌处理的花生叶片氮含量变化趋势不同。雨养条件下，叶片氮含量的下降趋势较为平缓，未出现急剧下降的趋势，具体表现为前期慢、后期快。而补灌处理下，在苗期—花针期内 N1 和 N2 处理不仅没有呈现下降的趋势，反而有所上升，随后在结荚期和饱果期呈现迅速下降的趋势，尤其是饱果期的下降速度明显高于雨养条件。不同施氮处理表现为施氮量越高，叶片含氮量越高。在该试验条件下，当施氮量为 80 $kg\cdot hm^{-2}$ 时，叶片氮含量最高，并且维持到生育末期。由此可知，在补灌条件下，良好的水分供应有利于花生叶片氮积累，并且可以延长积累时长至花针期。而在雨养条件下，叶片氮含量则一直下降。

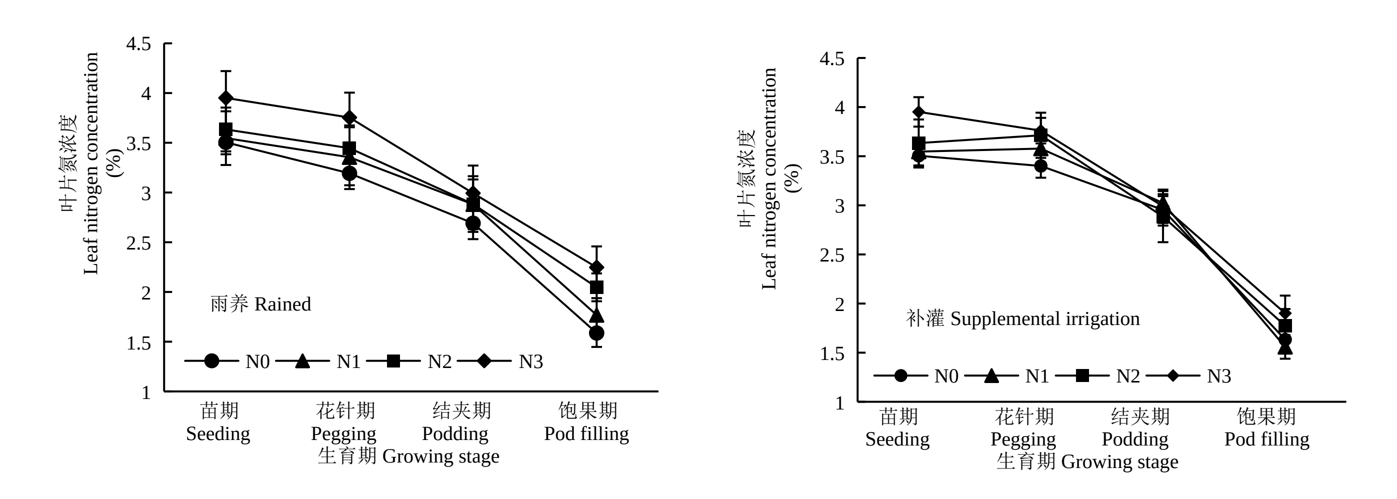


图 3　雨养(a)和测墒补灌(b)条件下不同施氮水平下花生叶片氮含量的动态变化

Fig. 3　Dynamic of nitrogen content in peanut leaves of different nitrogen rates under rainfed (a) and supplemental irrigation (b) conditions

N0、N1、N2 和 N3 分别表示施氮 0、40 kg·hm^{-2}、60 kg·hm^{-2} 和 80 kg·hm^{-2}。N0, N1, N2 and N3 represent nitrogen application rates of 0, 40 kg·hm^{-2}, 60 kg·hm^{-2}and 80 kg·hm^{-2}, respectively.

2.4　灌水和施氮对花生产量和水氮分利用效率的影响

2.4.1 对花生产量影响

灌水和施氮对花生产量和水分利用效率的影响如表 2。由表 2 可知，雨养条件下，施氮处理产量显著高于不施氮处理, N1、N2 和 N3 分别较 N0 增产 15.11%、18.01%和 19.15%，但各施氮处理间没有显著差异。说明在花生生长所需水分无法得到充足供应，施氮虽然可以起到增产作用，但是限制花生产量的更重要因素仍然是水分。补灌条件下，水分供应比较充足，此时，水分和氮素的交互作用促进花生产量的形成。随着施氮量的增加，花生产量呈现先增高后降低趋势，并在 N2 达到最大，并且 N1 和 N2 处理的产量显著高于 N0，这与植株氮积累的规律相似。

2.4.2　对花生水分利用效率的影响

由表 2 可知, W1N2 处理的花生水分利用效率最大，虽然与 W0N2 和 W0N3 处理之间差异不显著，但量却高于二者。雨养处理水分利用率大于测墒补灌，但产量却显著低于测墒补灌；并且随着施氮量的增加先增加后降低，在 N2 时达到最大。补灌条件下的灌溉水利用效率与水分利用率和产量的变化趋势一致。水分利用效率和灌溉水利用效率最高值均出现在 W1N2 处理，分别为 2.02 kg·m^{-3} 和 10.21 kg·m^{-3}。

2.4.2　对花生氮肥利用率的影响

由表 3 可知，施氮处理的氮收获系数显著高于不施氮处理，平均增加 12.50%。结合图 2D 可知增施氮不但不会增加植株氮积累量，而且还会降低荚果氮积累量占总积累量的比例，从而导致氮收获系数显著降低。相同施氮下，补灌处理的氮收获系数显著高于雨养处理。说明灌水和施氮均有利于花生植株对氮素的吸收和向生殖器官转运，但过量的施氮则会使氮收获系数呈现降低的趋势，这与产量和花生植株氮积累量的变化趋势类似。

氮肥农学利用率、籽粒氮肥吸收利用率和氮肥表观回收率分别反应氮肥对产量的贡献、氮肥对籽粒氮积累的贡献和氮肥对植株氮积累的贡献。灌水和施氮以及二者的交互作用对于氮肥农学利用率、籽粒氮肥吸收利用率和氮肥表观回收率影响均极显著(表 2)。灌水有利于氮肥农学利用率和籽粒氮肥吸收利用率的提高，但对于籽粒氮肥吸收利用率的提升却不显著。氮肥农学利用率和籽粒氮肥吸收利用率均随着施氮量的增加先升高后降低，说明适量的氮肥有利于产量的形成和籽粒氮积累，而过量的氮肥则会降低氮的贡献。不同水分情况下，施氮对于氮肥表观回收率的影响不一致，测墒补灌比雨养增加 25.90%，说明在补灌条件下增施氮肥更加有利于促进植株氮积累。雨养和补灌条件下由于施氮量变化而引起氮肥表观回收率变化的最大差值分别为 60.70 和 46.71 个百分点，说明不同施氮条件下补灌处理更加有利于植株的氮积累。雨养条件下，N2 处理下氮肥表观回收率最高，而在补灌条件下则是 N1 的氮肥表观回收率最高，分别为 72.83%和 85.66%，并且都达到显著水平。

表 2　补灌和施氮对花生产量、水分利用效率和氮利用效率的影响

Table 2　Effects of supplemental irrigation and nitrogen fertilization on yield, and water and nitrogen use efficiencies of peanut

灌水	施氮量	产量	水分利用效率	灌溉水利用效率	氮收获系数	氮肥农学利用率	籽粒氮肥吸收利用率	氮肥表观回收率
Water	Nitrogen	(kg·hm^{-2})	Water use	Irrigation water	Nitrogen harvest	Agronomic nitrogen	Nitrogen grain	Nitrogen recovery

condition (W)	rate (N)		efficiency (kg·m^{-3})	use efficiency (kg·m^{-3})	index (%)	efficiency	recovery efficiency (%)	efficiency (%)
W0	N0	4 155.63±11.53d	1.63±0.11c	—	66.38±3.33f	—	—	—
	N1	4 783.73±198.33c	1.83±0.18b	—	74.78±7.60c	15.70±1.25cd	25.22±2.27b	46.93±5.32b
	N2	4 903.87±543.75c	1.98±0.12a	—	74.26±6.54c	20.03±2.12bc	97.19±10.28a	72.83±8.39a
	N3	4 951.53±76.76c	1.95±0.13a	—	73.18±4.97d	9.95±1.30de	19.27±1.64b	12.13±0.91c
W1	N0	4 645.50±54.89c	1.41±0.13d	6.50±0.08c	66.96±6.46f	—	—	—
	N1	5 915.40±25.17b	1.76±0.09b	7.58±0.03b	81.22±7.93a	23.99±1.80b	37.92±4.38b	85.66±8.42a
	N2	6 485.03±46.57a	2.02±0.17a	10.21±0.07a	78.11±6.77b	38.82±3.49a	81.58±7.33a	41.44±4.18b
	N3	5 656.67±155.46c	1.73±0.09b	6.71±0.22c	68.46±5.97e	18.76±1.83c	21.54±1.39b	38.95±3.01b
显著性 Significance								
N		121.560**	120.662**		149.523**	357.184**	39.336**	9.962**
W		195.320**	114.930**		611.974**	142.815**	178.066**	80.194**
W × N		61.408**	46.017**		483.691**	99.082**	90.249**	37.772**

. W0 和 W1 分别为雨养和测墒补充灌; N0、N1、N2 和 N3 分别表示施氮 0、40 kg·hm^{-2}、60 kg·hm^{-2} 和 80 kg·hm^{-2}。同一列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。**表示极显著 P<0.01。W0 and W1 are treatments of rainfed and supplemental irrigation, respectively. N0, N1, N2 and N3 represent nitrogen application rates of 0, 40 kg·hm^{-2}, 60 kg·hm^{-2}and 80 kg·hm^{-2}, respectively. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level. ** means significant difference at 0.01 levels.

2.6 灌水和施氮对收获后土壤硝态氮累积量的影响

灌水和施氮对于土壤硝态氮累积的影响如图 4 所示。0~60 cm 土壤剖面的硝态氮累积量随施氮量的增加而显著增加。N0 处理下，测墒补灌处理的硝态氮累积量高于雨养处理，但不显著；而 N1、N2 和 N3 处理下，则是雨养处理高于补灌处理，且除 N3 外，全部达到显著水平。分别计算 3 个土层的硝态氮累积量占总量的比例可知，随着土层的加深，硝态氮的累积量逐渐降低。雨养条件下，硝态氮在 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中的累积量分别占 0~60 cm 总量的 50.39%、30.54%和 19.08%；而补灌条件下，为 40.50%、34.07%和 25.42%。补灌降低了土壤表层的硝态氮累积量，使硝态氮的分布区下移。可知雨养和测墒补灌处理硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层，雨养处理占比为 80.92%，测墒补灌为 74.57%，而花生根系分布同样为 0~40 cm。由此可知，补灌会降低 0~40 cm 的硝态氮含量，进而引起根系分布层内的土壤硝态氮含量变化。

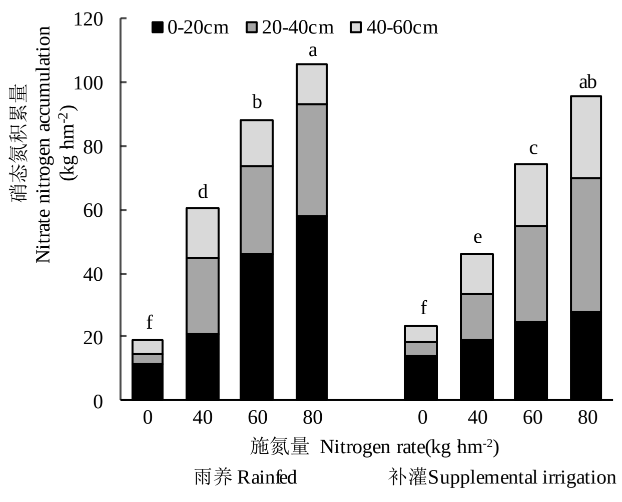


图 4 雨养和测墒补灌条件下不同施氮水平对收获后 0~60 cm 土层内土壤硝态氮累积的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen rate on NO_3^--N accumulation in 0–60 cm soil after peanut harvest under rainfed and supplemental irrigation

不同小写字母表示 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level.

3 讨论

3.1 补灌条件下施氮对花生干物质和氮素吸收利用及水分利用的影响

干物质积累是作物产量形成的基础，氮素营养是影响作物干物质形成的重要因素[22]。王才斌等[23]通过盆栽试验得出花生荚果产量随施氮量的增加呈二次曲线变化趋势，当施氮量为 150.9 kg hm^{-2} 时荚果产量最高，而荚果产量则是花生单产决定因素。在一定程度上，植物干物质的积累等同于氮积累，即呈现一定程度的正相关，因为随着植株干物质量的增加，植株内的氮素积累总量一定是增加的，但不同施氮处理之间的植株氮积累量也存在差异[24]。本试验表明，增施氮肥会显著增加花生的干物质积累、氮积累和荚果产量，而

且符合二次函数关系并且达到显著水平，雨养和补灌条件下，分别施氮 59.38 kg hm^{-2} 和 82.80 kg hm^{-2} 得到最大干物质量，施氮 62.57 kg hm^{-2} 和 65.20 kg hm^{-2} 得到最大荚果产量。说明水和氮两个生产要素符合边际产量递减规律，即不同水分条件下对应不同最优施氮量；而达到最优施氮量后，继续增加施氮量不但不能使产量或干物质量的明显增加，甚至会使其降低，这与 Gheysari 等[25]的研究结论类似。干物质形成和积累的基础是养分的吸收，而各生育阶段干物质和养分积累是产量形成的前提[26-27]。本试验结果表明，花生全生育期各器官的氮积累与分配存在差异，在花生苗期和花针期，花生生长的重点是叶片，而结荚期和饱果期则为荚果，这与花生生长发育规律一致。随着生育期的推进，花生叶片增多，并且底部叶片的氮化物转移到新叶中，从而维持了叶片的高含氮量[28]。植株全氮含量可以很好地反映作物氮素状况，并且与产量相关[29]。本试验中，随着生育期推进，花生植株氮积累增加，并且符合氮素边际递减规律。随着施氮量的增加，花生花针期和结荚的氮积累量显著增加，且荚果占植株总氮积累量的比例增加，表明施氮促进了生殖器官的发育，有利产量的形成。

关于作物水分利用效率，有研究结果认为，在缺水条件下，作物的水分利用效率偏高，高灌水量则会导致灌溉水利用效率降低[30]；同时也有研究指出较高的灌溉水生产效率是在不限制水分时出现的，因为此时可以获得高产[31]。本试验表明，补灌条件下，水分利用效率不但没有降低，而且呈现上升趋势。水分利用效率高，说明水分对氮素的调控效果好。表明补灌对花产量增加的边界效应超过了灌水量。在相同的施氮条件下，相对缺水的雨养处理的水分利用效率显著高于灌水的处理，但是在施氮 60 kg hm^{-2} 时，却没有显著差异，而此时补灌处理却得到最高的灌溉水利用效率(10.21 kg m^{-3})。由于本试验只进行了有无灌溉水的定性试验，因此对于不同灌水下限对灌溉水利用效率的影响的研究有待进一步研究。

3.2 补灌条件下施氮对土壤硝态氮含量及分布的影响

作物在胁迫条件下，自身会产生适应环境的调节能力。研究表明，在作物的水分或养分供应不足时，作物根系会因存在补偿效应而增强对土壤中水分和养分的吸收[32-33]。养分胁迫会抑制植株生长，随着施氮量的增加，养分胁迫得到缓解。而当作物的营养生长与生殖生长的均衡被破坏时(最大氮肥利用效率)，继续增加施氮，就会造成营养器官冗余生长，降低收获指数，推迟成熟甚至降低产量[34]，但此时则会增加硝态氮在土壤中的残留量。硝态氮是作物吸收利用的主要形态[35]，是衡量土壤供氮特征的主要参数[36]。因此研究不同灌溉条件下的土壤硝态氮含量尤为重要。一般来说，施氮量越高，土壤硝态氮累积量越高，发生硝态氮淋洗的风险也越大。同时，土壤硝态氮含量也随着生育期推移而变化。研究表明，氮肥全部基施的条件下，花生生育前期的 0~60 cm 土壤硝态氮含量显著高于成熟期，并且随着施氮量的增加而增加[37]。由此可知，高氮水平下会残存较多的氮肥，增加了集中降水或者大量灌溉时随水进入土壤深层的淋洗量，增加了浅层地下水污染的风险[38-41], Zotarelli 等[42]也得出类似结论。本研究表明，补灌条件下，施氮 80 kg hm^{-2}，土壤深层(40~60 cm)的硝态氮累积量以及占 0~60 cm 硝态氮含量的比例都明显高于雨养处理，说明硝态氮已经随水淋溶至作物根系分布层以下，这可能是该处理不能高产甚至减产的原因之一。因此，进行精确施肥，寻求氮肥的最佳生产力，并且保证氮肥发生淋溶的边界条件，这对于大田作物生产有着重要的意义。本试验土样仅取到 60 cm, 60 cm 以下土壤硝态氮分布及累积情况有待进一步研究。

4 结论

施氮量与花生干物质量和荚果产量存在显著的二次曲线变化关系。增加施氮量使花生植株氮素积累、土壤硝态氮含量和花生叶片氮浓度显著提升，并且显著提高了水分利用效率及灌溉水利用率。测墒补灌增加了氮量积累量和氮素收获指数，且优化了花生植株中氮素的分配。相对于雨养处理(忽略氮素处理)，补灌促使叶片氮含量降低，加速花生氮素向荚果中转移，提高花生氮收获系数 2.13%、氮肥农学利用率 78.57%、氮肥表观回收率 25.90%，有利于产量的形成和氮素吸收利用，但会加剧土壤硝态氮向土层深处运移造成淋失。土壤硝态氮主要分布在 0~40 cm 土层内，占 0~60cm 土层的 77.75%，且累积量随着施氮量的增高而增加，补灌降低了土壤表层的硝态氮累积量，使硝态氮的分布区下移。综合考虑花生的水氮利用效率，在辽西半干旱地区推荐 W1N2(测墒补灌结合 60 kg hm^{-2} 氮肥施用量)的田间管理方式能够增强花生对土壤氮素的吸收，并优化植株体内的转化，且具有较高的产量(6 485.03 kg·hm^{-2})、水分利用效率(2.02 kg·m^{-3})和灌溉水利用效率(10.21 kg·m^{-3})，能够为辽西半干旱地区节水创收提供重要的技术支撑。

参考文献 References

[1] 王汉中，殷艳．我国油料产业形势分析与发展对策建议[J]．中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414–421

Wang H Z, Yin Y. Analysis and strategy for oil crop industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 414–421

[2] 马文杰．中国食用油安全战略转变：国内条件与国际情景[J]．中国工程科学, 2016, 18(1): 42–47

Ma W J. Changes of China's edible oil security strategies: Domestic condition and international situation[J]. Engineering Sciences, 2016, 18(1): 42–47
[3] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778–783
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778–783
[4] 中华人民国和国国家统计局. 2016中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016
National Bureau of Statistics of People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2016[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016
[5] 杨吉顺, 李尚霞, 张智猛, 等. 施氮对不同花生品种光合特性及干物质积累的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 154–160
Yang J S, Li S X, Zhang Z M, et al. Effect of nitrogen application on canopy photosysthetic and dry matter accumulation of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(1): 154–160
[6] 孙虎, 李尚霞, 王月福, 等. 施氮量对不同花生品种积累氮素来源和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 153–157
Sun H, Li S X, Wang Y F, et al. Effects of nitrogen application on source of nitrogen accumulation and yields of different peanut cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 153–157
[7] 吕殿青, 同延安, 孙本华, 等. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8–15
Lü D Q, Tong Y A, Sun B H, et al. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 8–15
[8] 王红, 张瑞芳, 周大迈. 氮肥引起的面源污染问题研究进展[J]. 北方园艺, 2011, 35(5): 201–203
Wang H, Zhang R F, Zhou D M. Current situations and research progress of non-point pollution problems caused by nitrogen[J]. Northern Horticulture, 2011, 35(5): 201–203
[9] 孟美杉. 氮肥与水体硝酸盐污染及防治措施[J]. 北方环境, 2012, 25(3): 187–188
Meng M B. Nitrogen and water nitrate pollution and prevention measures[J]. Northern Environmental, 2012, 25(3): 187–188
[10] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: Sources, factors and mitigating strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 64(3): 237–256
[11] 姚珍珠, 夏桂敏, 王淑君, 等. 水分胁迫和斜发沸石应用对花生叶片光合特性及水分利用的影响[J]. 中国农村水利水电, 2016, (9): 105–110
Yao Z J, Xia G M, Wang S J, et al. Effects of water stress and clinoptilolite application on leaf photosynthetic characteristics and water use efficiency of peanut[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (9): 105–110
[12] 李美, 张智猛, 丁红, 等. 土壤水分胁迫对花生品质的影响[J]. 花生学报, 2014, 43(1): 28–32
Li M, Zhang Z M, Ding H, et al. Effects of soil water stress on peanut kernel quality[J]. Journal of Peanut Science, 2014, 43(1): 28–32
[13] 袁宇霞, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥灌水下限和施肥量对温室番茄生长、产量和生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 76–83
Yuan Y X, Zhang F C, Zhang Y, et al. Effects of irrigation threshold and fertilization on growth, yield and physiological properties of fertigated tomato in greenhouse[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 76–83
[14] 冯磊磊, 张富仓, 雷艳, 等. 不同生育期灌水和施氮对春玉米农田硝态氮迁移及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010, (4): 54–57
Feng L L, Zhang F C, Lei Y, et al. Effect of irrigation at different growth period and nitrogen fertilizer on transfer of nitrate nitrogen and yield of the spring maize[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (4): 54–57
[15] 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 88–96
Yue W J, Zhang F C, Li Z J, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 88–96
[16] 姜丽娜, 刘佩, 齐冰玉, 等. 不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 131–141
Jiang L N, Liu P, Qi B Y, et al. Effects of different nitrogen application amounts and seedling densities on nitrogen accumulation and transport in winter wheat at anthesis stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(2): 131–141
[17] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 872–881
Ding H, Zhang Z M, Dai L X, et al. Effects of water and nitrogen interaction on peanut root growth and yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 872–881
[18] 夏桂敏, 陈俊秀, 迟道才. 膜下滴灌水氮耦合效应对黑花生产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2016, (3): 1–6
Xia G M, Cheng J X, Chi D C. The effects of water and nitrogen interaction on yield of black peanuts under the condition of mulched drip irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, (3): 1–6

[19] 汤笑. 水氮及其互作对花生生理特性和产量品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007: 51–55
Tang X. The effect and interaction of irrigation and nitrogen fertilizer on physiological characteristics, yield and quality of peanut[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007: 51–55
[20] Xu Z Z, Yu Z W, Wang D, et al. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 191(6): 439–449
[21] Plaut Z, Butow B J, Blumenthal C S, et al. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature[J]. Field Crops Research, 2004, 86(2): 185–198
[22] 王小龙, 孟强, 谢永乐, 等. 施氮水平对夏播花生氮素及干物质积累的影响[J]. 花生学报, 2015, 44(3): 14–19
Wang X L, Meng Q, Xie Y L, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate on nitrogen and dry matter accumulation in summer peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2015, 44(3): 14–19
[23] 王才斌, 吴正锋, 刘俊华, 等. 不同供N水平对花生硝酸盐累积与分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 915–919
Wang C B, Wu Z F, Liu J H, et al. Influence of N rates on nitrate accumulation and distribution in peanut[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 915–919
[24] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 石羊河流域武威绿洲春玉米水氮耦合效应[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2222–2228
Liu X G, Zhang F C, Yang Q L, et al. Coupling effect of water and nitrogen on spring maize in Wuwei Oasis of Shiyang River Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2222–2228
[25] Gheysari M, Mirlatifi S M, Bannayan M, et al. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 809–821
[26] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713–726
Xing Y Y, Zhang F C, Zhang Y, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713–726
[27] 袁昌梅, 罗卫红, 张生飞, 等. 温室网纹甜瓜发育模拟模型研究[J]. 园艺学报, 2005, 32(2): 262–267
Yuan C M, Luo W H, Zhang S F, et al. Simulation of the development of greenhouse muskmelon[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(2): 262–267
[28] 焦雯珺, 闵庆文, 林焜, 等. 植物氮素营养诊断的进展与展望[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 351–355
Jiao W J, Min Q W, Lin K, et al. Progress and perspective on nutrition diagnosis of plant nitrogen[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(12): 351–355
[29] Leigh R A, Johnston A B. Nitrogen concentrations in field-grown spring barley: An examination of the usefulness of expressing concentrations on the basis of tissue water[J]. The Journal of Agricultural Science, 1985, 105(2): 397–406
[30] Ertek A, Şensoy S, Küçükyumuk C, et al. Irrigation frequency and amount affect yield components of summer squash (*Cucurbita pepo* L.)[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(1): 63–76
[31] Fabeiro C, De Santa Olalla F M, De Juan J A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(2): 93–105
[32] Anghinoni I, Barber S A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply[J]. Agronomy Journal, 1980, 72(4): 685–688
[33] Robinson D. The responses of plants to non-uniform supplies of nutrients[J]. New Phytologist, 1994, 127(4): 635–674
[34] Fritschi F B, Roberts B A, Travis R L, et al. Response of irrigated Acala and Pima cotton to nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(1): 133–146
[35] 李世清, 王瑞军, 李紫燕, 等. 半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库——土壤剖面中累积的硝态氮[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 1–13
Li S Q, Wang R J, Li Z Y, et al. Soil nitrogen pool not to be ignored residual NO_3^--N accumulated in soil profile in semiarid and semihumid agro-ecological system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 1–13
[36] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究Ⅰ. 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1782–1789
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen Ⅰ. Winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782–1789
[37] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏Ⅱ. 夏玉米[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 48–53
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. The spatio-temporal variations of soil NO_3^--N and apparent budget of soil nitrogen II. Summer maize[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(1): 48–53
[38] 郑永美, 冯昊, 吴正锋, 等. 氮肥调控对土壤供氮特征及花生氮素吸收利用的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(4):

481–486
Zheng Y M, Feng H, Wu Z F, et al. Effect of nitrogen fertilizer regulation on soil nitrogen supplying characteristics and utilization efficiency of nitrogen in peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(4): 481–486

[39] 张福锁. 最佳养分管理技术列单[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 17
Zhang F S. The Best Nutrient Management Technology List[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010: 17

[40] Wu Q, Xia G M, Chen T T, et al. Impacts of nitrogen and zeolite managements on yield and physicochemical properties of rice grain[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5): 93–100

[41] Wu Q, Xia G M, Chen T T, et al. Nitrogen use and rice yield formation response to zeolite and nitrogen coupling effects: Enhancement in nitrogen use efficiency[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2016, 16(4): 999–1009

[42] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M, et al. Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 116(1): 8–16